



Simulation Technology of  
Space Rendezvous and  
Docking System

Simulation Technology of  
Space  
Rendezvous  
and Docking System

空间交会对接  
系统仿真技术

■ 林西强 李英良 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 空间交会对接系统仿真技术

主 编 林西强

副主编 李英良

编 著 王 华 张海联 王 震 李九人

国防工业出版社

·北京·

# 内 容 简 介

空间交会对接是一项复杂的大型系统工程,参与系统多、流程复杂、飞行控制难度大、实时性要求高。为保证方案正确,载人航天工程总体研究了系统仿真技术,构建了交会对接仿真系统,实现了众多异构软件之间不同层次的高效交互,保证了联合仿真试验的全面性、客观性和真实性,为交会对接任务和空间实验室任务系统间接口验证提供了有效手段。本书从交会对接系统仿真实论体系出发,结合我国载人航天工程实践,对交会对接系统仿真基本理论、仿真系统架构、分布式仿真技术、交会对接仿真数学建模和仿真试验设计方法等方面进行了深入阐述,提出了大型分布式仿真系统构建的方法和思路。本书对从事交会对接及系统仿真技术研究的科技工作者具有较好的参考价值,也可供高等院校相关专业师生使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

空间交会对接系统仿真技术 / 林西强等编著. —北京:国防工业出版社, 2019. 1  
ISBN 978 - 7 - 118 - 11761 - 5

I. ①空… II. ①林… ②李… III. ①对接(航天) - 交会对接 - 计算机仿真 IV. ①V526 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 299984 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 1/4 字数 267 千字

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 序

空间交会对接技术是进行空间设施组装建造、物资补给、人员轮换、维修维护等在轨服务活动的基础,是开展大型航天活动的重大关键技术之一。“阿波罗”登月、“和平”号及国际空间站建造运行、航天飞机在轨补给和维修服务等任务的成功实施,都依赖于空间交会对接技术。自2011年以来,我国成功实施了5次交会对接飞行任务,通过神舟八号、九号、十号飞船与天宫一号目标航天器进行交会对接,神舟十一号飞船、天舟一号货运飞船与天宫二号空间实验室交会对接,标志着我国已经完全掌握了载人天地往返、空间交会对接和推进剂在轨补加等建造和运营近地轨道空间站的核心技术。

空间交会对接是一项复杂的大型系统工程,涉及运载火箭、追踪航天器、目标航天器、测控通信、发射场等系统,具有参与系统多、流程复杂、实时性要求高、人在回路、系统间协同和飞行控制难度大等特点。为了保证交会对接飞行全过程的方案合理优化并进行充分验证,载人航天工程总体提出并组织研制了交会对接仿真系统,在多层次的分布交互仿真系统架构基础上,利用各系统已有的实际任务软件,同时根据功能需要研制相应的模拟软件,实现了各类异构软件之间不同层次的高效交互,首次实现了载人航天工程大系统飞行任务联合仿真。可以全面、客观和真实地对交会对接正常和故障飞行状态方案进行仿真评价和检验,为系统间接口验证提供了一种可靠有效的手段,为我国交会对接任务和空间实验室任务的成功实施提供了有力的技术验证支持。

本书作者是我国载人航天工程总体科技工作者,参与了我国载人航天交会对接历次飞行任务,主持完成了我国载人航天工程总体的交会对接任务仿真系统、空间实验室任务仿真系统的设计和研制工作,在交会对接系统仿真领域具有较深的理论基础和丰富的工程实践经验。本书从交会对接系统仿真理论体系出发,同时结合我国载人航天工程实践,对交会对接系统仿真理论和方法、仿真系统架构、分布式仿真技术、交会对接仿真数学建模、仿真试验设计方

法等方面进行了深入和系统地阐述,提出了大型分布式仿真系统构建的方法和思路。本书对从事交会对接及系统仿真技术研究的科技工作者具有较好的参考价值。

周建

2018年9月30日

# 前 言

基于现有进入太空运载能力条件,交会对接技术是人类开展大型航天活动必不可少的关键技术,我国后续即将进行的空间站建造与运营,以及正在论证的载人月球探测、载人深空探测等复杂航天活动,都需要以交会对接技术为基础。

考虑到交会对接技术的复杂性,我国载人航天工程总体在实施首次交会对接任务前,建立了以数学仿真为主、实时和超实时相结合的载人航天交会对接任务仿真系统,将各关键要素通过软件集成在一起,开展了交会对接正常飞行过程、故障预案和边界条件等仿真,完成了神舟八号至十号交会对接任务飞行前的仿真验证,全面考核了载人航天工程各系统从目标航天器发射到载人飞船返回全过程协同完成任务的能力,验证了方案的正确性和工程各系统间的协调性。2014年以来,载人航天工程总体在交会对接任务仿真系统基础上,进一步统一设计了底层环境,设计研制了基础资源库层、中间件层、工具层和应用层软件,通过模型可视化组装方式,构建了具有较好通用性的空间实验室任务仿真系统,进一步提高了软件的可重用性和仿真系统的构建效率,完成了神舟十一号、天舟一号与天宫二号空间实验室的交会对接仿真,为空间实验室任务的圆满成功提供了有效验证手段。

本书的撰写出版,旨在对载人航天工程总体交会对接系统仿真手段和方法进行探索并总结。全书针对交会对接任务背景,从理论、实践上对交会对接系统仿真理论与建模进行了系统研究和阐述,提出了工程总体层面交会对接任务系统仿真新思路和方法,具有较好的参考价值。

全书共8章。首先,介绍了空间交会对接的基本概念及作用、基本特征和发展趋势,国内外交会对接技术发展概况,以及交会对接系统仿真技术的发展概况。其次,阐述了系统仿真的基本理论和方法,交会对接任务仿真系统架构和仿真平台,交会对接轨道及姿态动力学、外测/中继/导航数据模拟,远距离导引控制、自主控制仿真模型,可视化建模方法,以及交会对接仿真试验设计方法、数据处理方法和仿真项目管理。最后,面向工程应用,给出了我国交会对接任务系统仿真在实际任务中的应用实例,并对我国载人航天工程后续任务仿真系统建设进行了展望。

本书的编著得到了中国载人航天工程办公室、国防科技大学、航天科技集团有限公司五院、航天宏宇公司等单位的大力支持。尤岳、孙福煜、郭帅、王敏、杨科化、吕纪远、王齐惠等同志参加了部分章节的编写,李海阳、梁苏南、常武权、吕新广、范高洁、张亚峰、董文强、彭利文、刘成军、邓华等同志参加了仿真系统建设和仿真试验等工作,在此一并表示感谢。

本书主要面向从事航天及系统仿真等相关领域的科技工作者,也可供高等院校相关专业的教师和学生参考。我国空间站工程已进入关键阶段,后续对任务规划、飞行方案的验证更加复杂,希望本书的出版能对从事载人航天系统仿真工作的科研人员和管理人员有所帮助。

本书作者多年从事交会对接任务系统仿真研究工作,对系统仿真相关技术进行了较为全面的阐述,但交会对接系统仿真涉及诸多领域知识,理论性和实践性都很强,技术发展较快,书中难免有不足和疏漏之处,欢迎广大同行及读者批评指正。

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 交会对接概述 .....	1
1.1.1 交会对接的概念及作用 .....	1
1.1.2 交会对接任务基本特征 .....	2
1.1.3 交会对接技术发展趋势 .....	5
1.2 交会对接发展概况 .....	6
1.2.1 美国 .....	6
1.2.2 俄罗斯(苏联) .....	10
1.2.3 欧洲 .....	16
1.2.4 日本 .....	17
1.2.5 中国 .....	19
1.3 交会对接任务系统仿真技术发展概况 .....	21
1.3.1 航天任务系统仿真发展概况 .....	21
1.3.2 交会对接任务系统仿真发展概况 .....	27
1.3.3 有关启示 .....	32
1.4 小结 .....	33
参考文献 .....	33
第2章 系统仿真实理论与方法 .....	35
2.1 系统仿真概述 .....	35
2.1.1 系统、模型与仿真 .....	35
2.1.2 系统仿真的分类 .....	39
2.1.3 系统仿真步骤 .....	42
2.2 系统仿真的基本理论方法 .....	43
2.2.1 系统仿真基础理论 .....	43
2.2.2 仿真建模理论 .....	48
2.2.3 仿真系统理论 .....	51
2.2.4 仿真应用理论 .....	53



2.3	复杂系统仿真方法	56
2.3.1	分布交互仿真	56
2.3.2	多媒体/虚拟仿真	66
2.3.3	网格/协同仿真	69
2.4	小结	70
	参考文献	71
<b>第3章</b>	<b>交会对接任务仿真系统架构</b>	<b>72</b>
3.1	仿真系统研制开发技术	72
3.1.1	领域模型	72
3.1.2	体系结构	72
3.1.3	系统架构	74
3.2	系统需求分析	74
3.2.1	仿真任务	74
3.2.2	系统性能要求	76
3.2.3	软件构成	76
3.3	仿真系统层次结构	79
3.3.1	层次结构	79
3.3.2	拓扑结构	80
3.4	仿真子系统设计	81
3.4.1	航天员手动控制仿真子系统	81
3.4.2	追踪航天器仿真子系统	83
3.4.3	运载火箭仿真子系统	85
3.4.4	测控通信仿真子系统	85
3.4.5	目标航天器仿真子系统	87
3.4.6	仿真管理子系统	89
3.4.7	接入服务子系统	92
3.4.8	可视化子系统	93
3.5	仿真系统运行设计	95
3.5.1	规划环节	95
3.5.2	仿真环节	96
3.5.3	不同仿真任务运行流程设计	99
3.6	小结	101
	参考文献	101

<b>第4章 交会对接任务仿真平台</b> .....	103
4.1 基于HLA的仿真平台 .....	103
4.1.1 基于HLA仿真的联邦逻辑结构 .....	103
4.1.2 基于HLA仿真的联邦成员的运行过程 .....	104
4.1.3 基于HLA仿真的联邦成员接口 .....	104
4.2 基于HLA和共享内存的两层仿真平台 .....	105
4.2.1 HLA/共享内存两层仿真平台技术要求 .....	105
4.2.2 HLA/共享内存两层仿真平台技术原理 .....	106
4.2.3 HLA/共享内存两层仿真平台运行流程 .....	106
4.2.4 HLA/共享内存两层仿真平台交互模式 .....	108
4.3 仿真模型标准接口 .....	109
4.3.1 共享内存中间件 .....	109
4.3.2 仿真模型标准接口 .....	110
4.4 交会对接仿真管理软件 .....	113
4.4.1 仿真管理模式 .....	113
4.4.2 仿真管理实现 .....	115
4.5 小结 .....	115
参考文献 .....	116
<b>第5章 交会对接系统仿真建模</b> .....	117
5.1 交会对接轨道及姿态动力学建模 .....	117
5.1.1 轨道动力学建模 .....	117
5.1.2 姿态动力学建模 .....	118
5.1.3 轨道环境建模 .....	120
5.2 外测及中继测量仿真建模 .....	121
5.2.1 USB外测模型 .....	121
5.2.2 GNSS测量模型 .....	123
5.2.3 中继测量模型 .....	125
5.3 远距离导引控制优化模型 .....	129
5.3.1 控制目标和基本模型 .....	129
5.3.2 特征点变轨策略 .....	132
5.3.3 综合变轨策略 .....	138
5.4 自主控制仿真模型 .....	142
5.4.1 测量敏感器模型 .....	142
5.4.2 执行机构模型 .....	151

5.4.3	GNC 计算模块 .....	153
5.5	交会对接任务可视化仿真 .....	153
5.5.1	交会对接任务可视化仿真的组成 .....	154
5.5.2	可视化仿真硬件平台 .....	155
5.5.3	可视化仿真实体建模 .....	157
5.5.4	可视化仿真数据驱动 .....	162
5.6	小结 .....	162
	参考文献 .....	162
<b>第6章</b>	<b>交会对接仿真试验设计与数据处理方法</b> .....	<b>164</b>
6.1	交会对接仿真试验设计方法 .....	164
6.1.1	基本概念 .....	164
6.1.2	试验设计基本原则 .....	165
6.1.3	试验设计基础方法 .....	167
6.1.4	交会对接仿真试验设计 .....	176
6.2	交会对接仿真数据处理方法 .....	177
6.2.1	输入数据分析 .....	177
6.2.2	输出数据分析 .....	178
6.2.3	提高仿真精度的方差缩减技术 .....	186
6.2.4	交会对接仿真数据处理 .....	188
6.3	交会对接仿真项目管理方案 .....	191
6.3.1	项目管理概述 .....	191
6.3.2	交会对接仿真项目管理实例 .....	192
6.4	小结 .....	195
	参考文献 .....	196
<b>第7章</b>	<b>我国交会对接任务系统仿真应用实例</b> .....	<b>197</b>
7.1	仿真系统运行模式 .....	198
7.1.1	仿真实验室内部闭环运行模式 .....	198
7.1.2	仿真实验室与飞控中心闭环运行模式 .....	199
7.1.3	仿真实验室与航天员中心闭环运行模式 .....	199
7.1.4	仿真实验室与飞控中心和航天员中心闭环运行模式 .....	200
7.2	仿真主要工作流程、模式及阶段划分 .....	200
7.2.1	主要工作流程 .....	200
7.2.2	主要工作模式 .....	200
7.2.3	主要阶段划分 .....	200

7.3	交会对接正常飞行过程仿真 .....	201
7.3.1	仿真目的 .....	201
7.3.2	仿真内容 .....	201
7.3.3	仿真主要结果 .....	202
7.4	交会对接故障预案仿真 .....	207
7.4.1	载人飞船远距离导引段变轨偏差过大 .....	207
7.4.2	自动交会对接故障转手控交会对接 .....	208
7.5	边界条件仿真 .....	209
7.6	小结 .....	209
	参考文献 .....	210
<b>第8章</b>	<b>展望 .....</b>	<b>211</b>
8.1	空间站任务仿真系统初步总体设计 .....	213
8.1.1	总体思路 .....	213
8.1.2	仿真需求 .....	213
8.1.3	系统方案设计 .....	215
8.2	载人月球探测任务仿真系统构想 .....	220
8.2.1	总体思路 .....	221
8.2.2	仿真需求 .....	221
8.2.3	系统方案设计 .....	222
8.3	航天任务仿真技术发展趋势 .....	224
8.4	小结 .....	226
	参考文献 .....	227
<b>附录</b>	<b>有关坐标系的定义 .....</b>	<b>228</b>

# 第1章 绪论

2011—2013年,我国先后成功实施了神舟八号、神舟九号、神舟十号飞船与天宫一号目标航天器的交会对接任务,突破和掌握了空间交会对接技术。2016—2017年,我国又成功完成了神舟十一号飞船、天舟一号货运飞船与天宫二号的交会对接,使交会对接技术在空间实验室任务阶段得到进一步验证和巩固,为我国后续空间站建造奠定了坚实基础。在我国实施交会对接任务期间,工程总体组织构建了交会对接任务仿真系统,首次进行了交会对接全任务过程全系统联合仿真,验证了任务方案正确性、系统间接口协调匹配性,为任务的成功实施提供了有力的技术验证支持。本章首先阐述空间交会对接的基本概念、作用、基本特征和发展趋势,以及国内外交会对接发展概况,而后介绍交会对接系统仿真技术的发展及应用情况。

## 1.1 交会对接概述

### 1.1.1 交会对接的概念及作用

交会对接(Rendezvous and Docking, RVD)技术是指两个航天器于同一时间在轨道同一位置以相同速度会合并连成一个整体的技术。通常,参与交会对接的两个航天器一个为被动航天器,另一个为主动航天器。被动航天器不做任何机动或仅做少量机动,称为目标航天器或目标器,如空间站或空间实验室。主动航天器要执行一系列的轨道机动飞向目标器,称为追踪航天器或追踪器,如飞船或航天飞机等。

空间交会对接包括两部分相互衔接的空间操作,即空间交会和空间对接。交会是指目标航天器在已知轨道上稳定飞行,而追踪航天器执行一系列的轨道机动,与目标航天器在空间轨道上按预定位置和时间相会。对接是指在完成交会后,两个航天器在空间轨道上接近、接触、捕获和校正,最后紧固连接成一个组合航天器的过程。

交会对接技术是实施空间组装、物资补给、人员轮换、在轨服务等任务的基础,是进行高级空间操作的一项关键技术,主要应用如下:

(1) 在轨组装大型航天器。由于火箭运载能力有限,进行大型航天器平台建造需要以交会对接技术为基础,将航天器舱段或部件分批发射入轨,而后采用直接对接或空间组装的方式,将它们连接形成一个航天器整体。“和平”号空间站及国际空间站在建造过程中均大量采用了交会对接技术。

(2) 空间站补给及人员轮换。空间站长期在轨运行期间,需要定期进行物资补给和人员轮换,这也依赖于交会对接技术。物资补给通常采用货运飞船或航天飞机,人员轮换可采用载人飞船或航天飞机,通过与空间站对接建立天地往返通道。

(3) 航天器在轨服务。通过在轨服务航天器与待服务航天器(如部分功能丧失航天器或失效航天器)进行空间交会对接,而后对其进行维修或推进剂补加,使其恢复功能,能够延长航天器工作寿命,可产生重大经济效益。美国曾多次利用航天飞机与哈勃太空望远镜进行交会对接,通过航天员出舱方式对其进行维修和部件模块更新升级,有效延长了哈勃太空望远镜的工作寿命。

(4) 深空探测任务。在未来载人月球探测及以远的深空探测任务中,航天器质量规模将非常庞大,需要通过多次发射,在近地轨道、月球轨道、行星轨道或拉格朗日点进行交会对接完成航天器组装。完成行星表面探测后,航天员需乘坐上升器与行星轨道上的飞行器进行交会对接,将航天员转移返回地球。

## 1.1.2 交会对接任务基本特征

### 1. 交会任务类型

在进行交会对接任务分类时,由于对接通常是一个标准程序,一般不以对接阶段任务进行区分,交会对接任务的不同类型主要体现在交会阶段。从任务约束条件和技术要求出发,划分交会任务为如下几种类型:

#### 1) 释放和捕获

从任务规划的角度而言,释放和捕获是最简单的交会任务类型。追踪航天器释放目标到几千米至几十千米处,然后再接近捕获目标航天器。美国航天飞机早期的交会对接的飞行试验任务即是此种类型,日本的 ETS-7 交会对接也是释放和捕获型。

#### 2) 空间启动交会

空间启动交会是指追踪航天器和目标航天器启动交会时均在空间轨道上。基于空间的交会通常难以保证满足初始轨道共面和初始相位角要求,当初始轨道非共面时将会带来巨大的燃料消耗。为了避免大的异面机动,通常要求一个长的滑行段,利用地球引力场摄动引起的升交点赤经漂移,使轨道面自然演化到共面。轨道机动航天器(Orbital Maneuvering Vehicle, OMV)和轨道转移航天器

(Orbit Transfer Vehicle, OTV)执行的交会任务通常属此种类型。

### 3) 地面启动交会

地面启动交会是指追踪航天器启动交会对接任务时从地面发射,目标航天器在空间轨道上。这也是目前实际执行最多的交会对接任务。追踪航天器发射时应尽可能瞄准虚拟目标平面,以保证两航天器交会时升交点经度、轨道倾角一致,从而最大限度地减小轨道平面修正控制量。俄罗斯“联盟”/“进步”号飞船交会对接、美国的“双子星座”号交会对接、“阿波罗”登月飞船交会对接,美国航天飞机的大部分交会对接,以及我国神舟载人飞船/天舟货运飞船交会对接均属此类。不加特别注明,人们通常所说的交会对接也即是指此类交会对接。

### 4) 多次交会

多次交会是指在一次飞行任务中,追踪航天器同多于一个目标航天器完成交会对接。一个简单的多次交会的例子就是航天飞机捕获一个卫星,然后将它转移到空间站。简单的多次交会在“双子星座”和航天飞机的飞行任务中,以及“联盟”-T15飞船与“和平”号空间站、“礼炮”七号空间站的多次交会对接中都实现过。此外,美国的XSS-11飞行试验也进行了多次交会对接飞行任务。

### 5) 往返交会

往返交会是多次交会任务的特例,特指追踪航天器在完成交会任务后重新回到基站。追踪航天器通常是一个轨道机动服务器,基站可能包括空间站、航天飞机等,交会任务通常用来捕获和维修有效载荷。

### 6) 合作/非合作目标交会

根据目标器是否合作分类,通常可以将交会对接分为两类,即合作目标交会对接和非合作目标交会对接。目标器的合作主要指测量敏感器的合作,同时也可以包括目标器为交会对接进行的轨道配合等,以减少追踪器的机动任务负担。载人航天器的交会对接大都是合作目标交会对接。非合作目标交会是在交会过程中,目标器不主动向追踪器提供任何信息支持,同时也不通过主动机动方式配合交会过程,与交会相关的测量及控制参数需通过追踪器或追踪器地面测控系统获取。

## 2. 交会对接轨道

根据交会对接所处的空间环境,可以将交会对接飞行任务和飞行轨道大致划分为3种类型,即近地轨道交会对接、地球同步轨道交会对接和月球/行星轨道交会对接。

### 1) 近地轨道交会对接

截至目前,人类进行的交会对接飞行绝大部分是在近地轨道完成的。美国的“双子星座”飞船、航天飞机,俄罗斯的“联盟”和“进步”系列飞船,以及我国

神舟载人飞船/天舟货运飞船完成的交会对接均是在近地轨道完成的。在近地轨道进行交会对接有 4 个典型的任务需求:①突破和掌握交会对接技术;②建造大型的空间站;③航天员轮换、运输燃料和设备,取回空间试验产品或样品;④释放、回收和维修卫星。

美国和俄罗斯为了掌握交会对接技术,在近地轨道进行了多次无人和载人的交会对接飞行试验。对建造大型的空间站来说,需要通过运载工具多次发射各种舱段,然后组装成大型空间站,如苏联 20 世纪 80 年代发射和组装的“和平”号空间站,以及由美国、俄罗斯、欧洲、日本等多个国家或组织参与组装的国际空间站。空间站长期在轨运行时,需要定期轮换航天员,补充燃料消耗和生活必需品,以及更换设备和取回试验产品或样品。美国航天飞机执行交会对接任务完成了多次卫星捕获和维修任务。

## 2) 地球同步轨道交会对接

在地球同步轨道进行交会对接主要用于组装大型通信平台,此外还包括一些需要更换陈旧设备、加注燃料和维修等轨道服务活动。

## 3) 月球/行星轨道交会对接

有些特定或星际飞行任务需要在月球/行星轨道之间进行交会对接或者仅需要交会。例如,“阿波罗”飞船登月舱返回环月轨道,然后与指挥舱交会对接。未来实施载人火星探测任务,需要像“阿波罗”飞船登月类似的飞行程序,在火星轨道上进行交会对接。此外,行星轨道交会任务还包括飞行器与行星之间的交会,如 1975 年发射的“海盗”空间探测器,先与火星进行交会,然后在火星表面软着陆。由于信号传输延迟方面的原因,在其他行星进行交会对接,无法获得地面的实时支持,通常需要实现自主交会对接。

## 3. 交会对接方式

根据交会对接控制的自动和自主程度,通常可以将其分为下列 4 类:①遥控操作,由地面站操作员或目标航天器上的航天员通过遥测和遥控来实现;②手动操作,航天员利用船载设备进行观察和操作;③自动控制,不依靠航天员,由船载设备和地面站相结合实现交会对接;④自主控制,不依靠地面站,完全由船载设备来实现。这种自主控制方式,航天员可参与。若航天员不参与,则是自动自主方式,它在技术上比较复杂。上述 4 种方式有各自的特点和使用范围,已实现的交会对接通常包含了多种控制方式。对于两个航天器相距较近的控制来说,美国从“双子星座”号开始就主要采用手动操作,并一直沿用到航天飞机的交会对接中,俄罗斯的“联盟”号和“进步”号、欧洲航天局自动转移飞行器 ATV 则主要采用自动控制方式。目前,我国神舟载人飞船主要采用手动操作方式或自动控制方式,天舟货运飞船则主要采用自动控制方式或自主控制方式。



根据对接方向的不同,交会对接通常可划分为 $-V\text{-bar}$ (后向)、 $+V\text{-bar}$ (前向)、 $R\text{-bar}$ (径向)对接以及其他特定逼近方向对接。 $-V\text{-bar}$ 与目标航天器速度方向相反, $+V\text{-bar}$ 与目标航天器速度方向一致, $R\text{-bar}$ 由目标航天器指向地心。不同的对接口方向必然会要求截然不同的逼近段轨道,相应地会带来交会轨道、交会对接传感器安装(包括目标和追踪)以及制导控制系统的不同,可以作为区分不同交会对接任务的标准。美国的航天飞机为了适应不同的任务需求,具备在 $-V\text{-bar}$ 、 $+V\text{-bar}$ 和 $R\text{-bar}$ 三个方向进行对接的能力。在与国际空间站对接中,航天飞机主要采取 $+V\text{-bar}$ 对接方式,“联盟”号、“进步”号和欧洲航天局自动转移飞行器 ATV 主要采取 $-V\text{-bar}$ 对接方式。

### 1.1.3 交会对接技术发展趋势

美国多次成功实施“阿波罗”登月,俄罗斯“和平”号空间站长期稳定运行,航天飞机与“和平”号空间站的对接飞行,表明美国和俄罗斯已经熟练掌握了载人交会对接技术。国际空间站的建造、组装与投入使用,充分利用了已有成熟技术,并实现了多国航天器之间的交会对接,推动交会对接技术达到了更高水平。在交会对接技术发展初期阶段,由于微电子、信息技术、激光和光学成像技术还不发达,这种复杂在轨操作技术主要依靠航天员,并辅以地面在有限时间的遥控。如今世界高技术正在迅猛发展,空间活动越来越频繁,今后空间交会对接将成为例行和常规的在轨操作技术。考虑技术进步和经济效益因素,交会对接技术发展趋势如下:

#### 1) 交会对接向自动自主化方向发展

根据美国和俄罗斯所走的道路,航天员直接操作交会对接往往需要花费他们许多宝贵的时间,从几个小时到几天,劳动强度很大,而且利用航天员目视进行对接操作的窗口还受光照条件的严格限制。但是,手动操作交会对接仍然是自动交会对接的必要补充,可以在自动系统失灵的情况下保证交会对接的顺利进行。此外,交会对接如果不能自主进行,则需要分布很广的地面站及大量地面工作人员。这种分布很广或全球分布的地面站,在经济和管理方面都要付出巨大的代价,同时也不是当今技术发展的方向。

#### 2) 交会对接向标准化方向发展

从当今航天事业发展的趋势看,因航天事业耗资巨大,通常需要充分利用国际上的资源和力量。为了各个国家能够共同合作,必须研究交会对接技术的国际标准。事实上,美、日、欧洲等国家和地区在决定建立国际空间站之前,就已经着手开发交会对接技术的国际统一标准并取得了一定成果。

根据以上分析,无论从需要还是可能,未来的交会对接将在全球导航系统和